

高压输电线路复合绝缘子检修技术与质量评估标准研究

胡 磊

南方电网超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要：本文聚焦高压输电线路复合绝缘子，先分析常见故障类型，涵盖机械损伤、绝缘性能劣化、外力破坏和制造缺陷等，并从材料、环境、制造及运行等方面剖析成因。接着研究关键检修技术，包括带电检测、故障修复和检修作业安全技术。然后构建质量评估标准体系，设计涵盖机械、绝缘和耐候性能的评估指标，明确实验室、现场检测及运行数据评估方法，制定分级评估标准。最后通过工程案例验证相关技术与标准的有效性。

关键词：高压输电线路；复合绝缘子；检修技术；质量评估；标准化

1 高压输电线路复合绝缘子常见故障类型及成因分析

1.1 常见故障类型

复合绝缘子作为高压输电线路的核心部件，其故障类型直接影响电网运行安全。根据运行数据与故障案例分析，主要故障类型可分为以下四类：（1）机械损伤故障。机械损伤主要表现为护套磨损、伞裙撕裂及芯棒断裂。护套磨损多由鸟类啄食或外力冲击导致，例如国网河北省电力公司在500kV线路验收中发现74基铁塔的复合绝缘子存在鸟啄破损，破损部位集中在上端护套。伞裙撕裂则与强风、冰雹等极端天气相关，柔性硅橡胶材料在长期机械应力作用下易出现疲劳裂纹。芯棒断裂是复合绝缘子最严重的机械故障，其成因包括材料脆断、蠕变过度及制造缺陷，例如某特高压线路因芯棒酸蚀导致断裂，引发大面积停电事故；（2）绝缘性能劣化故障。绝缘性能劣化主要表现为憎水性丧失与界面击穿。硅橡胶材料在长期紫外线照射和污秽沉积下，表面憎水性逐渐减弱，尤其在连续雨雾天气中，憎水性可能完全丧失，导致污闪电压下降。界面击穿则源于护套与芯棒间的粘接失效，水分侵入后引发局部放电，最终形成贯穿性击穿通道。某500kV线路红外检测发现，部分绝缘子高压侧护套出现纵向裂纹，伴随硅橡胶变硬、粉化现象，表明材料已严重老化；（3）外力破坏故障。外力破坏以鸟害和雷击为主。鸟害故障占复合绝缘子闪络事故的较高比例，鸟类排泄物在绝缘子表面形成导电通道，降低外绝缘性能。例如，有机合成绝缘子因伞间距较小，鸟粪易桥接伞裙，导致飞弧短接现象。雷击故障则与绝缘子耐雷水平不足相关，雷击过电压使绝缘子发生闪络、烧伤，甚至引发炸裂^[1]；（4）制造缺陷故障。制造缺陷包括端部密封不良、材料配比失误及工艺缺陷。端部密封不良会导致水分侵入芯棒，引发电化学腐蚀；材料配比失误会降低硅橡胶的耐候性和机械强度；工艺缺陷如

伞裙注射成型不完整，会形成局部电场集中。

1.2 故障成因分析

复合绝缘子故障成因具有多因素耦合特征，需从材料、环境、制造及运行四方面综合分析：硅橡胶材料在长期运行中面临紫外线、臭氧及化学腐蚀的联合作用，其分子链断裂导致憎水性迁移能力下降。同时，芯棒材料（如ECR玻璃纤维）的耐酸性能直接影响绝缘子寿命，若材料配比不当，酸蚀速率将显著加快。污秽沉积是导致绝缘子劣化的关键环境因素。工业废气中的SO₂、NO_x与颗粒物在绝缘子表面形成导电层，在潮湿条件下引发污闪。例如，华东地区某变电站因周边化工厂排放，导致绝缘子盐密值超标，引发区域性污闪事故。此外，高海拔地区紫外线强度高，会加速硅橡胶老化；沿海地区盐雾腐蚀则导致金属附件锈蚀，影响机械强度。制造工艺直接影响绝缘子质量。端部密封工艺中，高温整体注射成型密封效果优于室温硫化粘接，但部分厂家为降低成本采用后者，导致密封层易开裂。伞裙成型工艺中，注射成型可减少内部缺陷，而粘接分装式工艺易产生气泡，降低局部放电电压。金具压接工艺不当会导致芯棒与金属附件间存在间隙，引发应力集中。运行维护不足表现为检测手段落后及清扫周期过长。传统定期巡检难以发现隐蔽缺陷，如复合绝缘子的界面击穿在早期无明显外观变化，需通过红外热成像或紫外成像技术检测。清扫周期过长则导致污秽积累，某500kV线路因未及时清扫，在雾霾天气中发生多起污闪事故。

2 高压输电线路复合绝缘子关键检修技术研究

2.1 带电检测技术

带电检测是实时掌握绝缘子状态的核心手段，主要包括红外检测、紫外检测及超声波检测：红外检测通过捕捉绝缘子表面温度分布差异，识别局部过热缺陷。例如，护套裂纹会导致水分侵入芯棒，引发局部放电并产

生热量，红外热像仪可清晰显示高温区域。某特高压线路检修中，红外检测发现一串复合绝缘子高压侧温度比其他区域高，经解剖验证为芯棒酸蚀导致的局部放电^[2]。紫外检测利用电晕放电产生的紫外线信号，定位绝缘子表面电晕源。该技术可区分电晕放电与外部干扰，双通道设备（紫外线+可见光）可同步显示放电位置与设备图像。某500kV线路紫外检测发现，部分绝缘子伞裙边缘存在持续电晕，经处理后电晕信号消失，表明检测有效。超声波检测通过分析反射波特征，识别绝缘子内部缺陷。对于复合绝缘子，超声波可检测护套与芯棒间的脱粘、气泡等缺陷。某研究采用超声波相控阵技术，对运行中的复合绝缘子进行扫描，成功识别出多处界面脱粘缺陷，验证了技术的可行性。

2.2 故障修复技术

故障修复需根据缺陷类型选择针对性方案，主要包括护套修补、伞裙更换及整体更换：护套修补适用于局部磨损或裂纹，采用高温硫化硅橡胶修补条进行粘接。修补前需清洁缺陷表面，涂抹偶联剂增强粘接强度。某500kV线路检修中，对鸟啄破损的护套进行修补，经耐压试验验证，修补后绝缘性能恢复至设计值。伞裙更换适用于严重撕裂或老化伞裙，采用注射成型工艺更换新伞裙。更换时需控制注射压力与温度，避免产生气泡或裂纹。某特高压线路检修中，对老化伞裙进行整体更换，经检测，更换后伞裙的憎水性及机械强度均满足要求。整体更换适用于芯棒断裂或界面击穿等严重缺陷，需采用专用吊装工具进行更换。更换前需核对新绝缘子型号与参数，确保与原线路匹配。某500kV线路因雷击导致绝缘子炸裂，采用整体更换技术恢复运行，经后续检测未发现异常。

2.3 检修作业安全技术

检修作业安全需从人员防护、设备接地及环境监控三方面保障：（1）人员防护技术。人员防护包括穿戴屏蔽服、绝缘手套及安全帽，防止电击与高空坠落。屏蔽服需满足标准，确保在高压场强下人体电流小于安全值。某检修作业中，工作人员因未正确穿戴屏蔽服，在接触带电设备时发生电弧灼伤，凸显人员防护的重要性；（2）设备接地技术。设备接地需采用双接地线，确保接地电阻小于标准值。接地线应采用多股软铜线，避免机械损伤导致接地失效。某500kV线路检修中，因接地线断裂引发感应电伤人事故，后续检修中加强接地线检查与维护；（3）环境监控技术。环境监控包括实时监测风速、湿度及温度，确保检修作业在安全条件下进行。风速超过规定值时需停止高空作业，湿度过高时需加强

防潮措施。某特高压线路检修中，因未监测湿度导致绝缘子受潮，引发后续运行中污闪事故，凸显环境监控的必要性。

3 高压输电线路复合绝缘子质量评估标准体系构建

3.1 质量评估指标设计

质量评估指标需涵盖机械性能、绝缘性能及耐候性能方面：机械性能指标包括拉伸强度、弯曲强度及冲击韧性。拉伸强度反映芯棒与护套的粘接强度，弯曲强度体现绝缘子抗弯能力，冲击韧性表征材料抗冲击性能。例如，标准规定复合绝缘子拉伸强度需大于设计值，确保在极端天气下不发生断裂。绝缘性能指标包括工频耐压、雷电冲击耐压及污闪电压^[3]。工频耐压验证绝缘子在工频电压下的绝缘能力，雷电冲击耐压评估抗雷击性能，污闪电压反映抗污秽能力。例如，某500kV线路要求复合绝缘子污闪电压大于设计值，确保在重污秽地区安全运行。

耐候性能指标包括憎水性、紫外线老化及盐雾腐蚀。憎水性通过静态接触角测量，紫外线老化通过加速老化试验评估，盐雾腐蚀通过中性盐雾试验验证。例如，标准规定复合绝缘子憎水性需达到特定等级，确保在长期运行中不丧失绝缘性能。

3.2 质量评估方法

质量评估方法包括实验室检测、现场检测及运行数据评估：（1）实验室检测方法。实验室检测通过模拟运行条件，评估绝缘子性能。例如，采用盐雾试验箱进行中性盐雾试验，验证绝缘子耐腐蚀性能；采用紫外线加速老化试验箱，评估材料耐候性。某厂家通过实验室检测发现，某批次绝缘子憎水性迁移时间超标，及时调整工艺避免质量问题；（2）现场检测方法。现场检测通过便携式设备对运行中的绝缘子进行检测。例如，采用红外热像仪检测局部过热，紫外成像仪定位电晕源，超声波探伤仪识别内部缺陷。某500kV线路现场检测中，通过红外检测发现一串绝缘子高压侧温度异常，经解剖验证为芯棒酸蚀，及时更换避免事故；（3）运行数据评估方法。运行数据评估通过分析历史故障数据，评估绝缘子可靠性。例如，统计某型号绝缘子运行中的故障率、失效率及事故率，结合可靠性试验数据，评估其生命周期。

3.3 质量评估标准制定

质量评估标准是保障输电线路安全稳定运行的关键，需紧密结合国际标准与国内实际状况，构建一套科学且全面的分级评估体系。在制定标准时，应充分参考国际电工委员会（IEC）的相关标准，明确绝缘子的基本性能要求。例如，针对复合绝缘子，详细规定其憎水

性必须达到特定的等级标准，以确保在潮湿环境下仍能保持良好的绝缘性能；机械强度要严格满足设计值，保障在各种外力作用下不发生损坏。同时，要充分考虑国内复杂多样的气候与运行条件，制定补充标准。对于高污秽地区，由于环境中的污染物较多，容易引发污闪事故，所以要提高对绝缘子污闪电压的要求；在高海拔地区，紫外线辐射强烈，会加速绝缘子的老化，需增加紫外线老化试验的强度。基于上述标准，建立分级评估体系，将绝缘子划分为优、良、中、差四个等级。优级绝缘子各项指标均完全满足要求；良级绝缘子存在轻微缺陷，但不影响正常运行；中级绝缘子存在一定问题，需限期处理；差级绝缘子存在严重隐患，必须立即更换。

4 工程案例分析

4.1 工程概况

某500kV输电线路全长200公里，采用复合绝缘子悬垂串与耐张串。线路途经工业区与农田，污秽等级为Ⅲ级，雷暴日数为40天/年。运行5年后，线路故障率上升，需进行全面检修与质量评估。

4.2 检修技术应用

带电检测技术应用；采用红外检测、紫外检测及超声波检测技术，对全线绝缘子进行检测。红外检测发现10串绝缘子存在局部过热，紫外检测定位5处电晕源，超声波检测识别3处界面脱粘缺陷。故障修复技术应用；对局部过热绝缘子进行护套修补，对电晕源进行清洁处理，对界面脱粘缺陷进行伞裙更换。修复后经耐压试验验证，绝缘性能恢复至设计值。检修作业安全保障；检修作业中，工作人员穿戴屏蔽服与绝缘手套，采用双接地线确保设备接地，实时监测风速与湿度，确保作业安全。

4.3 质量评估实践

实验室检测实践；抽取部分绝缘子进行实验室检测，发现憎水性迁移时间超标，紫外线老化后拉伸强度

下降。分析表明，材料配比与制造工艺存在缺陷。现场检测实践；通过便携式设备对运行中的绝缘子进行现场检测，验证实验室检测结果。现场检测发现，部分绝缘子存在隐蔽缺陷，需加强检测频率^[4]。运行数据评估实践；统计线路运行5年来的故障数据，计算故障率、失效率及事故率。结合可靠性试验数据，评估绝缘子生命周期为7年，建议缩短检修周期至3年。质量改进措施；根据质量评估结果，提出改进措施：优化材料配比，改进制造工艺，加强运行维护，建立分级评估体系。实施改进措施后，线路故障率显著下降，运行可靠性提升。

结束语

高压输电线路复合绝缘子的可靠运行对电网安全至关重要。本文深入探讨了其故障类型、成因，研究了检修技术并构建质量评估标准体系，通过工程案例验证了可行性与有效性。未来，随着电网规模扩大和环境变化，需持续优化检修技术与评估标准，加强新材料、新工艺研发应用，提升复合绝缘子性能，为电网安全稳定运行提供更有力保障，推动电力行业高质量发展。

参考文献

- [1]范帅,王博文,李峰,等.高海拔、污秽、覆冰气候地区下高压输电线路绝缘子的选择研究[J].电瓷避雷器,2020(6):170-176.
- [2]王胜,陈文,匡小兵,张彬,常心悦,郑欣.一种基于多特征显著性融合的绝缘子区域检测与定位算法[J].计算机应用研究,2020,37(S2):351-353.
- [3]李凡,高瞻,王红斌,李爽,庞健,徐开雄,余正涛.基于对抗自学习的跨域绝缘子检测算法[J].南京理工大学学报,2020,44(06):651-659.
- [4]周贺,张家倩,蒋乐,等.特高压直流输电线路直线塔V型悬垂绝缘子串选型[J].安徽电气工程职业技术学院学报,2024,29(03):27-33.